

Universidad Autónoma de Madrid

Estudio de distintos métodos de audio watermarking

Trabajo de fin de grado – Ingeniería de Tecnologías y servicios de
Telecomunicaciones

Javier Riera del Moral
Tutor: Joaquín González Rodríguez
24 de junio del 2020

Resumen

El desarrollo de las técnicas audiovisuales y su difusión por las redes han dado pie a investigaciones para resolver los problemas causados por la violación de los derechos de autor. Las técnicas de watermarking utilizan el principio de la esteganografía para ocultar la información de copyright en la propia señal multimedia. En este trabajo realizamos un estudio de 3 técnicas de audio watermarking mediante el desarrollo de código en MATLAB. Este código se ejecutará y se analizarán los resultados para comentar las ventajas e inconvenientes de dichos algoritmos, junto con propuestas para mejorarlos y adaptarlos a su uso en aplicaciones que luchen contra estas violaciones de derechos.

Palabras clave:

Watermarking, esteganografía, marca de agua, copyright, audio, espectro ensanchado, eco escondido, enmascaramiento, MATLAB.

Key words:

Watermarking, steganography, watermark, copyright, audio, spread spectrum, echo hiding, masking, MATLAB.

Tabla de contenido

1	Introducción	5
2	Ocultar información: Diferencias entre esteganografía y watermarking	6
3	Watermarking digital	7
4	Clasificación de un sistema de watermarking	8
	4.1 Medio	8
	4.2 Perceptibilidad	8
	4.3 Robustez	8
	4.4 Privacidad	9
	4.5 Reversibilidad.....	9
5	Aplicaciones principales	10
6	Técnicas clásicas de audio watermarking	11
	6.1 Eco escondido o <i>Echo Hiding</i>	11
	6.2 Espectro ensanchado o <i>Spread Spectrum</i>	12
	6.3 Noise Shaping.....	13
7	Algoritmos implementados.....	14
	7.1 Echo Hiding	15
	7.1.1 Integrador de la marca.....	15
	7.1.2 Extractor de la marca	15
	7.2 Spread Spectrum (dominio temporal).....	16
	7.2.1 Integrador de la marca.....	16
	7.2.2 Extractor de la marca	16
	7.3 Spread Spectrum (dominio frecuencial DFT)	17
	7.3.1 Integrador de la marca.....	17
	7.3.2 Extractor de la marca	17
8	Evaluación de los resultados	18
	8.1 Echo Hiding	19
	8.2 Spread spectrum (dominio temporal)	20
	8.3 Spread Spectrum (dominio frecuencial DFT)	21
	8.4 Noise Shaping.....	22
9	Conclusiones	24
10	Anexo 1: Sistema Auditivo Humano (HAS)	26
11	Anexo 2: Enventanado de señales.....	28
12	Bibliografía.....	31

Índice de tablas

Tabla 1: clasificación de los sistemas de watermarking.....	8
Tabla 2: Variables objetivo de estudio para las técnicas desarrolladas.....	14
Tabla 3: Resultados algoritmo Echo Hiding para voz limpia.....	19
Tabla 4: Resultados algoritmo Spread spectrum en el dominio temporal para voz limpia.	20
Tabla 5: Resultados algoritmo Spread spectrum en el dominio DFT para voz limpia.....	21
Tabla 6: Resultados algoritmo Spread spectrum en el dominio temporal para voz limpia incluyendo Noise Shaping.	22
Tabla 7: Ventanas a estudiar amplitudes solapadas.....	28
Tabla 8: Métodos implementados.....	30

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema de un sistema genérico de watermarking [1]	7
Figura 2: Respuesta al impulso de $h(n)$. (a) bit "1". (b) bit "0".	11
Figura 3: representación de las señales involucradas en los datos de la tabla 3. (a) $N = 511$. (b) $N = 2047$	19
Figura 4: Representación de las señales involucradas en los datos de la tabla 4. (a) $N = 511$. (b) $N = 2047$	20
Figura 5: Representación de las señales involucradas en los datos de la tabla 5.....	21
Figura 6: Representación de las señales involucradas en los datos de la tabla 6.....	23
Figura 7: Umbral absoluto de audición [5]	26
Figura 8: Esquema de las distintas regiones donde se produce enmascaramiento [6]	27
Figura 9: Ventanas Hanning y Hamming y sus correspondientes solapamientos al 50% y al 33.3%.....	28
Figura 10: Ventanas y solapamientos. (a) Blackman. (b) Triangular. (c) Gaussiana. (d) Kaiser .	29

1. Introducción

La técnica de incluir marcas de agua sobre archivos de audio (en adelante referenciada como audio watermarking) consiste en añadir información oculta sobre el audio de un archivo conteniendo información relevante, de forma que sea imperceptible al oído humano, pero permita la futura extracción de dicha información para el uso que se le tenga asignado. Este método se ha evaluado principalmente en aplicaciones para la protección de derechos de autor para audio digital u otros productos multimedia.

Para que esta técnica sea de utilidad como herramienta para reforzar estos derechos de autor, el algoritmo encargado de marcar el audio de entrada y extraerlo del audio obtenido por el canal tiene que superar distintas dificultades, como la imperceptibilidad de la marca sobre el audio, la robustez frente al ruido añadido por el canal, o la protección frente a modificaciones en la marca por personas ajenas a los dueños de los derechos.

Aunque su uso para la protección de datos sea la aplicación más extendida para el audio watermarking, otras aplicaciones para las que se ha planteado el uso de esta tecnología son la autenticidad del contenido, o para el control de copias.

El objetivo de este TFG es evaluar distintos métodos para aplicar el audio watermarking sobre señales y analizar sus ventajas e inconvenientes para distintas aplicaciones en función de la robustez, imperceptibilidad y capacidad que ofrece frente a los otros métodos.

Primero de todo, en esta memoria se hablará sobre las diferentes técnicas más utilizadas para el audio watermarking, después se introducirá al código desarrollado y al diseño de este. Después se comentarán las distintas pruebas realizadas con distintos tipos de audios y un resumen de los resultados, finalizando con las conclusiones obtenidas tras la realización del trabajo y frente a los resultados obtenidos.

2. Ocultar información: Diferencias entre esteganografía y watermarking

Ocultar información es un término general para el uso de técnicas capaces de ocultar cierta información dentro un contenido, para nuestro caso en este trabajo, un contenido multimedia como puede ser un archivo de sonido. Aunque con ocultar nos podemos referir tanto a mantener la existencia de esa información secreta como a que sea indescifrable para aquellos que la puedan interceptar. Esta es la diferencia entre la criptografía y la esteganografía, ambas siendo subdisciplinas del conjunto de ocultar información [1]. El termino técnico de la esteganografía viene de las palabras en griego “*steganos*” que significa cubierto u oculto, y la palabra “*graphia*” que significa escritura. La esteganografía, por lo tanto, consiste en alterar un medio de forma que sea indetectable para cubrir un mensaje oculto [2]. Un ejemplo de esteganografía puede considerarse la historia de Heródoto, que cuenta como un esclavo mandado por su dueño, Histieo, fue enviado a Aristágoras, un familiar suyo, con un mensaje tatuado en su cabeza, el cual se dejó crecer el pelo con el objetivo de ocultarlo. Una vez llegó a Mileto, la ciudad donde le esperaba Aristágoras, este se afeitó la cabeza para hacer entrega del mensaje, siendo en este caso el tatuaje la información oculta, y el esclavo el mensaje anfitrión [2].

Aunque la idea de la esteganografía sea diferente a la de la criptografía, funcionan muy bien juntas, dando pie a una segunda capa de seguridad en el mensaje oculto. Este método consistiría en encriptar el mensaje mediante el uso de claves y después ocultarlo en el mensaje anfitrión. Este concepto es utilizado en los esquemas de audio watermarking para mejorar su seguridad [1].

La idea detrás del watermarking viene principalmente de la necesidad de añadir información al mensaje sobre su autor o dueño de ese contenido. Por ejemplo, si ocultáramos en un archivo de música compuesta por nosotros, y de la cual tenemos los derechos, estaríamos hablando de watermarking, de forma que, si alguien afirmara posesión sobre esa canción, podríamos afirmar mediante la extracción de esa información oculta que dicho audio es de nuestra propiedad.

Sin embargo, la esteganografía y el watermarking son dos áreas de información oculta con enfoques distintos, y aunque las dos necesitan de una robustez mínima para proteger la información oculta dentro del mensaje, la imperceptibilidad no es estrictamente necesaria para el watermarking, mientras que para la esteganografía es necesaria por pura definición. Un ejemplo para esto es la marca de agua en los billetes, que es completamente visible y fácilmente detectable a la luz. La esteganografía tampoco necesita una robustez muy dedicada ya que suele ser utilizada para comunicaciones entre personas conocidas, mientras que el watermarking tiene que ser más robusto ya que está abierto al público y cualquiera podría intentar obtener, eliminar o modificar la información secreta [1].

3. Watermarking digital

La digitalización sobre todas las áreas de la tecnología ha ampliado el uso de las técnicas de watermarking abriéndose camino en su uso para ocultar información en archivos de audio, video e imágenes digitales proporcionando una marca imperceptible para las personas. El watermarking digital relaciona el contenido marcado con su creador de forma que sea imperceptible para los consumidores y se pueda utilizar en caso de que haya violado su uso legal.

Los sistemas de watermarking consisten principalmente en 3 fases, El generador de la marca (*Watermark generator*), el integrador de la marca (*Watermark embedder*), y el detector (*Watermark detector*). En el siguiente esquema vemos el funcionamiento genérico de un sistema de watermarking donde introducimos la marca de agua y la señal a marcar (o *host signal*) y extraemos del canal de transmisión la señal marcada de la que luego obtendremos la marca. Este esquema también incluye los niveles adicionales de seguridad que proporciona la criptografía de la que hemos hablado anteriormente y de las cuales tenemos que conocer las llaves para poder descryptarlo en el detector.

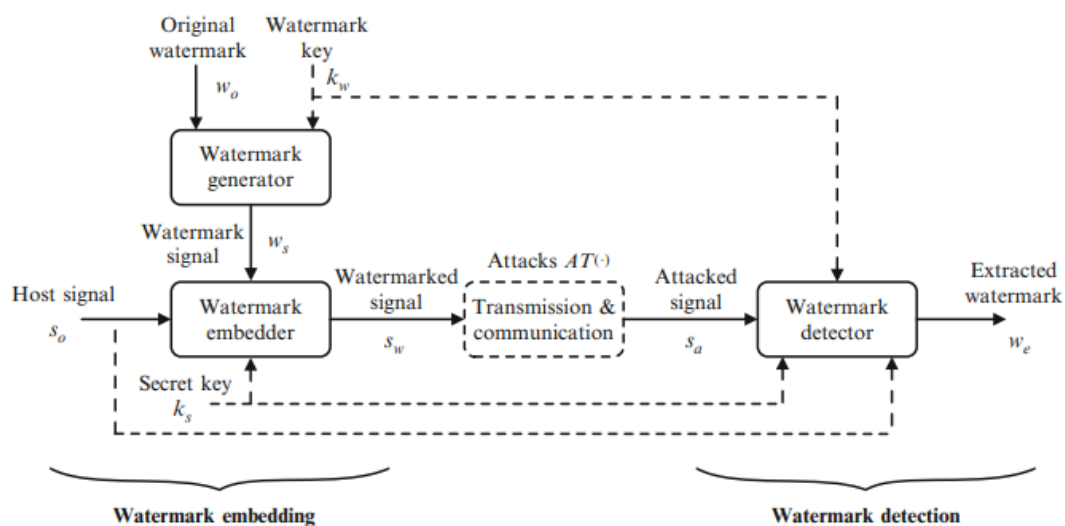


Figura 1: Esquema de un sistema genérico de watermarking [1]

Para el resto del trabajo cuando se haga referencia al watermarking se dará por hecho que se habla de watermarking digital.

4. Clasificación de un sistema de watermarking

Para cada sistema de watermarking es necesario tener en cuenta un cierto número de factores dependiendo de la aplicación detrás de ese sistema. Dichos factores consisten en:

Medio	Audio, video, imagen, texto
Perceptibilidad	Perceptible o no perceptible
Robustez de la marca	Robusto, semi-frágil, frágil
Necesidad de la señal original en detección	Publica, privada
Reversibilidad	Reversible o no reversible

Tabla 1: clasificación de los sistemas de watermarking

4.1 Medio

Hay distintos tipos de archivos digitales que pueden ser marcados. Al comienzo de la tecnología del watermarking digital se empezó marcando imágenes, y, procesando el video como secuencia de imágenes estáticas se ha podido marcar cada una de ellas de acorde con la secuencia. En el caso del audio supone un reto en comparación con las imágenes, esto se debe principalmente a la alta sensibilidad del sistema auditivo humano (HAS, anexo 1) y a la falta de redundancia en los archivos de audio. El uso de técnicas de watermarking para archivos de texto también ha sido objetivo de estudio para la tarea de protección de datos en archivos digitales distribuidos [1].

4.2 Perceptibilidad

Para imágenes y video, las marcas de agua suelen consistir en logos u otros patrones situados en alguna de las esquinas de la imagen, produciendo una marca de agua visible pero no obstruyente. En el caso del audio nuestro principal objetivo es buscar la imperceptibilidad de la marca, aunque esto pueda suponer un reto extra en la complejidad del algoritmo.

4.3 Robustez

Cuando nos referimos a la robustez de una marca de agua nos referimos a la capacidad que tiene de resistir manipulaciones por terceras personas, evitando así su correcto funcionamiento. Aunque lo primero que pensamos es que, a mayor robustez mejor, esto es así para aplicaciones dedicadas a protección de los derechos de autor, verificación de la propiedad digital u otras aplicaciones dedicadas a seguridad aunque también existen aplicaciones en la que una marca de agua frágil puede ser de utilidad, como por ejemplo para verificar la autenticidad de un archivo, ya que al ser vulnerable a todo tipo de ataques, estos modificarán la marca de agua dándonos información de que el archivo ha sido modificado.

Las marcas semi-frágiles son aquellas que permite defenderse de algunos ataques, pero siendo vulnerables a otros.

4.4 Privacidad

Una marca de agua privada, es decir, es necesaria la señal original antes de ser marcada, permite que la señal sea mucho más robusta, pero al ser necesaria la señal original puede ser muy poco versátil al compartir estos archivos por la red. Es por esto por lo que la mayoría de las técnicas de watermarking son de carácter público.

4.5 Reversibilidad

Una señal reversible consiste en la posibilidad de recuperación exacta de la señal original, suponiendo un gran coste en robustez y seguridad, Sin embargo, las señales irreversibles incluyen una pequeña degradación en la señal original. Los algoritmos de watermarking reversible son solo considerables en aplicaciones donde la recuperación exacta de la señal original es totalmente necesaria [1], por ejemplo, aplicaciones médicas, donde después serán necesarias hacer valoraciones o diagnósticos.

Teniendo en cuenta estas clasificaciones se puede desarrollar un sistema de watermarking en función de la aplicación que vaya a utilizarlo. Para este proyecto de audio watermarking se ha estudiado un sistema robusto a ataques, de baja perceptibilidad, público e irreversible.

5. Aplicaciones principales

Las técnicas de watermarking fueron creadas con el propósito de protección del copyright en contenido multimedia, lo que atrajo más atención a partir de la era del contenido digital a comienzos de los 90. Como las técnicas de audio watermarking funcionan generalmente cuando se ha infringido los derechos del copyright, raras veces son utilizados para prevenirlo.

Estas son las aplicaciones para las que las técnicas de audio watermarking son más utilizadas:

La **protección del copyright** consiste en la idea de introducir una marca de agua con la información de copyright directamente en el archivo de audio, de forma que cuando haya disputas sobre el autor o el dueño de esos derechos se pueda extraer esa marca como prueba. Para que esto pueda funcionar correctamente, es necesario que la marca de agua sea inseparable del audio y muy robusta ante los ataques que intenten destruirla [1].

Para la **autenticación de contenido** el objetivo principal consiste en verificar que el contenido digital ha sido objetivo de modificaciones no autorizadas. Como la marca de agua sufre las mismas alteraciones que el audio marcado, es posible obtener resultados sobre las alteraciones analizando la marca de agua resultante. Para esta aplicación interesa una marca de agua poco robusta [1].

Finalmente, el **control de copia** se enfoca más en prevenir que un archivo obtenido de maneras no ilícitas sea reproducible. Consiste en que el reproductor lea la marca de agua antes de reproducir el archivo y si detecta que la marca de agua contiene una anotación que difiere con la oficial entonces no reproduce dicho archivo.

Las técnicas de watermarking digital también han sido utilizadas en monitorización de programas en directo, control de dispositivos o seguimiento de transacciones entre otros.

Aparte de sus aplicaciones comerciales, muchas compañías han invertido en sus propias tecnologías basadas en audio watermarking de las cuales destacan Microsoft Corporation y Cisco Technology [3].

6. Técnicas clásicas de audio watermarking

Las técnicas de audio watermarking tratadas en este trabajo consisten en eco escondido (*Echo hiding*), espectro ensanchado (*Spread Spectrum* o *SS*) y la ampliación para ambas conocida como "*Noise shaping*". De estas técnicas solo el eco escondido es específica para aplicaciones de audio watermarking, mientras que las otras 2 sirven para aplicaciones basadas en imagen y video también.

Estas técnicas cuentan con métodos distintos para esconder la marca dentro del audio anfitrión. En este capítulo comentaremos el funcionamiento básico de estas técnicas para marcar una secuencia $w_0(n)$ en un audio de entrada $s(n)$.

6.1 Eco escondido o *Echo hiding*

El eco escondido marca el audio introduciendo ecos, que, con un diseño correcto de amplitudes y retardos, son percibidos como resonancia del propio audio y no producen ruidos desagradables [1 y 3]. Esta técnica hace uso de los enmascaramientos temporales que produce el sistema auditivo humano (HAS, anexo 1) para ocultar los bits de la marca.

En el proceso de marcar la señal anfitriona consiste en convolucionar la señal con un filtro $h(n)$ el cual consiste en la siguiente expresión:

$$h(n) = \delta(n) + \alpha * \delta(n - d)$$

donde α es la amplitud del eco y d es el retardo. La idea para diferenciar entre un bit "1" y un bit "0" es utilizar dos retardos diferentes, normalmente usando valores de aproximadamente 2.3 y 3.4 ms. La respuesta al impulso se muestra en la figura 2.

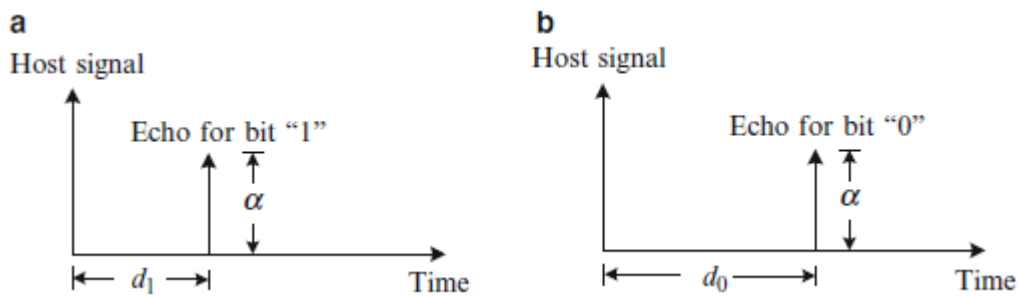


Figura 2: Respuesta al impulso de $h(n)$. (a) bit "1". (b) bit "0".

El resultado de la señal marcada es el siguiente:

$$s_w(n) = s(n) + \alpha * s(n - d)$$

Para obtener la marca, se hace uso de las propiedades del dominio cepstral para hallar el valor del retardo aplicado en esa ventana de la señal. El dominio cepstral se realiza bajo la siguiente ecuación:

$$\hat{s}_w(n) = F^{-1}\{\log(F\{s_w(n)\})\}$$

Aunque también para potenciar la amplitud de los picos que queremos evaluar se usa la autocorrelación del cepstrum, o auto-cepstrum lo cual nos da la energía en de la ventana en función con la muestra. Esto se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C_a(n) = F^{-1}\{\log(F\{s_w(n)\})^2\}$$

En el dominio del auto-cepstrum se verá un pico en las muestras $n = d_1$ para las ventanas con bit = "1" y $n = d_0$ para las ventanas con bit = "0". Por lo tanto, comparando la energía entre esas dos posiciones de n obtendremos si la marca consiste en un 1 o en un 0.

$$w_e(i) = \{1, \text{si } C_a(d_1) \geq C_a(d_0) ; 0, \text{si } C_a(d_1) < C_a(d_0)\}$$

Este es el esquema más sencillo, si quisiéramos añadir más robustez al algoritmo podríamos utilizar un filtro $h(n)$ que consista en utilizar más ecos para cada bit usando distintos retardos y por lo general usando un eco positivo y otro negativo, de forma que esto no afecte a la perceptibilidad de la marca. Este esquema usa un filtro de la siguiente forma:

$$h(n) = \delta(n) + \alpha_1\delta(n - d) - \alpha_2\delta(n - d - \Delta)$$

siendo $|\Delta| \leq 5$ muestras.

6.2 Espectro Ensanchado o *Spread Spectrum*

La técnica de espectro ensanchado es conocida como la más utilizada entre las técnicas de watermarking. Esta técnica consiste en marcar a lo largo de todo el espectro de la señal anfitriona, de forma que la energía en cada banda de frecuencia sea muy baja y, por tanto, poco detectable. Esto le da a la señal marcada una alta robustez y seguridad, aunque este método puede introducir distorsiones perceptibles en el audio, por lo que para evitar este efecto se usan amplitudes basadas en el enmascaramiento del modelo psicoacústico (anexo 1).

La idea principal de la técnica de SS comienza aplicando una transformada a la ventana de la señal sin marcar. Las más comunes son la transformada discreta de Fourier (DFT), la transformada discreta del coseno (DCT) o la transformada discreta de wavelets (DWT), aunque también se puede hacer directamente en el dominio temporal.

Una vez situada la ventana de nuestra señal en el dominio objetivo, utilizamos una secuencia pseudo aleatoria, r_s , con valores repartidos entre -0.5 y 0.5 e introducimos la marca a la señal bajo la siguiente ecuación.

$$s_i^w(n) = s_i(n) + \alpha * w_0(i) * r_s$$

Donde α es la intensidad de la marca.

La extracción de la marca consistirá en una correlación lineal de las mismas ventanas donde marcamos la señal, con la secuencia r_s . En el caso de que la señal anfitriona y la marca tengan correlación entre ellas, esta puede provocar un error al extraer la marca, es por eso por lo que en los algoritmos más modernos se aplican filtros de preprocesamiento lineales o filtros cepstrales entre otros [1].

6.3 Noise Shaping

Noise shaping no es como tal una técnica de audio watermarking ya que se puede implementar junto con otras técnicas como el espectro ensanchado. Esta técnica consiste en adaptar la intensidad de la marca a la energía de la ventana de análisis junto con las ventanas anterior y posterior. Esto permite mejorar la imperceptibilidad de la marca para tramas donde la energía del audio es pequeña y mejorar la robustez de las tramas con energía más alta.

En este trabajo hablaremos de un código basado en la técnica de espectro ensanchado en el dominio temporal donde incluimos esta ampliación en función de la energía de la ventana y sus ventanas contiguas y evaluaremos sus resultados junto con el de las otras 2 técnicas comentadas anteriormente.

7. Algoritmos implementados

En este capítulo trataremos una versión de los algoritmos explicados anteriormente desarrollada en MATLAB y explicaremos paso a paso el funcionamiento de cada uno de los bloques representados en la figura 1. Cada script se basa en 3 grandes etapas, El generador de la marca, el integrador de la marca en el audio anfitrión y el extractor de la marca.

Para los 3 scripts, el generador de la marca es el mismo, consistiendo en un programa que lee una entrada de teclado, convirtiéndola a una secuencia de bits y después le aplica a esa secuencia la repetición correspondiente. Devolviendo la secuencia binaria y la versión donde el bit 0 es representado con “-1”.

El propósito principal de este trabajo consiste en hacer un estudio sobre el funcionamiento de las distintas técnicas de watermarking y la calidad de los resultados. Todos los scripts funcionan bajo el uso de ciertos parámetros que modificaremos en las distintas ejecuciones para ver su efecto en los resultados. Estos parámetros son los representados en la tabla 2 junto con una explicación de su efecto en el código.

Nombre de la variable	Explicación	Parámetros por estudiar
Tipo de audio	El funcionamiento de la técnica dependerá de las características del archivo de audio que estemos marcando, por eso, realizaremos pruebas con distintos tipos de audio con características diferentes.	Música, voz, voz con ruido ambiental
N	Número de muestras por ventana, concuerda con el tamaño de las secuencias mls	511, 2047
Rep	Para reducir el número de fallos por bit, el parámetro rep transforma la marca para repetir un número determinado de veces cada bit. Por ejemplo, si tuviésemos una secuencia [1 0 1] con rep=3 esta equivaldría a [1 1 1 0 0 0 1 1 1], reduciendo la tasa binaria, pero mejorando la robustez	1, 3
Weight	Es el peso que tiene la marca respecto a la señal anfitriona	Depende del algoritmo
Peso	Solo para el audio de voz con ruido ambiental. Es el peso que se le da al ruido respecto a la señal de voz.	0.01 (SNR = 20dB), 0.1 (SNR = 10dB), 0.35 (SNR = 5dB).
Método	índice para expresar el tipo de ventana y el solapamiento aceptados por el código. Explicado cada método aceptado en el anexo 2.	Solapamientos del 0%, 33,3% y 50%

Tabla 2: Variables objetivo de estudio para las técnicas desarrolladas

En este capítulo se muestra el pseudocódigo de los programas diseñados para más tarde evaluar los resultados en base a este.

7.1 Echo Hiding

7.1.1 Integrador de la marca:

Seudocódigo:

separamos la señal en tramas según el solapamiento que queremos
buscamos el valor del retardo en muestras tanto para el bit 1 como
para el bit 0

diseñamos los filtros $h(n)$ en función de dicho retardo

```
for k=1: número de ventanas
    trama_env = obtenemos la trama que vamos a utilizar y la
                enventanamos en función del solapamiento (anexo 2)

    if (Wo(k) == 1)
        añadimos el eco con d1
    else
        añadimos el eco con d0
    end
end
```

recolocamos las tramas para generar el audio de 1 canal.

La idea principal para el funcionamiento de este integrador es crear 2 filtros $h(n)$ con retardos diferentes para el bit 0 y el bit 1, convolucionando la trama de la señal enventanada con dicho filtro para añadir los ecos. Finalmente reordenamos las tramas ya convolucionadas para generar un único canal con toda la señal de audio para su próxima reproducción.

7.1.2 Extractor de la marca:

Seudocódigo:

```
for k=1: número de ventanas
    calculamos el valor del autocepstrum de la ventana actual
    sumamos las energías del autocepstrum en las muestras
        correspondientes a d1 y d0 y las guardamos en E_1 y E_0

    if (E_0 > E_1), entonces detectamos un '0'
    else, detectamos un '1'
    end
end

trabajamos con la marca recuperada en caso de que la repetición sea
    distinta de 1
representamos los datos
```


Para la recuperación buscamos valores del retardo del eco en el dominio cepstral y catalogamos como 1 o como 0 en función de la energía representada en las muestras correspondientes.

7.2 Spread spectrum (dominio temporal)

7.2.1 Integrador de la marca:

Seudocódigo:

Dividimos en tramas la señal de entrada en función del solapamiento

```
for k=1: número de ventanas
    trama_env = obtenemos la trama que vamos a utilizar y la
                enventanamos en función del solapamiento (anexo 2)
    sumamos a la trama la secuencia pseudo aleatoria ponderada para el
                bit '1' o le sumamos la secuencia invertida para bit '0'
end
```

recolocamos las tramas para generar el audio de un único canal.

A cada ventana le sumamos muestra por muestra la secuencia pseudo aleatoria multiplicada por 1 en caso de ser para representar un bit = '1' o multiplicada por -1 para un bit = '0'. En el código diseñado utilizamos una secuencia mls. Las secuencias mls consisten en secuencias pseudoaleatorias binarias de longitud N-1, siendo N una potencia de 2, periódicas y que reproducen todas las secuencias binarias posibles que pueden ser representadas por registros de desplazamiento (excepto el vector 0).

7.2.2 Extractor de la marca:

Seudocódigo:

```
for k=1: número de ventanas
    calculamos la correlación entre la secuencia pseudo aleatoria y la
                ventana de la señal
end

if Rep==1
    for k=1:nb
        if correlación >=0
            detectamos que el bit es = '1'
        else
            detectamos que el bit es = '0'
        end
    end
end
if Rep == 3
    trabajamos para hacer una votación entre los 3 bits de repetición y
        detectar el que más se repita
end
```

representamos los resultados obtenidos.

La recuperación de la marca se basa en la correlación entre la secuencia utilizada y la señal, con la problemática de que el audio anfitrión puede afectar a la correcta extracción de la marca dando resultados con bits alterados.

7.3 Spread spectrum (dominio frecuencial DFT)

7.3.1 Integrador de la marca:

Seudocódigo:

```
for k = 1: número de ventanas
    trama_env = obtenemos la trama enventanada
    realizamos la transformación mediante la función fft

    introducimos la secuencia pseudoaleatoria en las primeras N
        muestras del módulo de la señal

    con el módulo marcado y la fase de la señal original obtenemos el
        espectro de la señal marcada
    pasamos de vuelta al dominio temporal
end

reorganizamos las tramas marcadas para tener un audio de un único canal
```

El funcionamiento para el dominio frecuencial es en esencia el mismo que para el dominio temporal, aunque en frecuencia marcamos el módulo de la señal anfitriona en vez de implementarla directamente sobre el audio.

7.3.2 Extractor de la marca:

Pseudocódigo:

```
for k=1: número de ventanas
    transformamos el audio marcado de vuelta al dominio frecuencial
    obtenemos el módulo de esta señal
    obtenemos la correlación entre la secuencia mls y la marca
        extraída del módulo.
end
obtenemos los resultados en función del valor de Rep.
```

Para la extracción seguimos utilizando una correlación entre la secuencia mls y, en este caso, el módulo de la señal marcada. En caso de ser positiva detectamos un "1" y, si no, detectamos un 0".

8. Evaluación de los resultados

La calidad de los resultados que esperaríamos de una técnica de audio watermarking dependen fundamentalmente de la aplicación para la cual la vayamos a utilizar, y dependiendo de esta aplicación, algunas técnicas se ajustaran mejor a sus especificaciones que otras. Esto supone una dificultad al hacer la evaluación de las distintas técnicas a estudiar en este trabajo. La evaluación de los resultados consistirá principalmente en los datos obtenidos para la robustez de la marca y la perceptibilidad de esta frente al audio de entrada.

La perceptibilidad de la marca es un parámetro complicado de analizar ya que se basa en una toma de datos cualitativa y dependiendo de las personas que lo evalúen u el entorno donde se escuche, se obtendrán unos resultados u otros. Aun así, podemos evaluar parcialmente esta perceptibilidad en función de la relación señal a ruido (SNR) entre el audio de entrada y la marca de agua. Esta evaluación se realizará siguiendo la siguiente ecuación.

$$SNR(dB) = 10 * \log_{10} \frac{\sum_n [s_0(n)]^2}{\sum_n [s_w(n) - s_0(n)]^2}$$

Siendo $\sum_n [s_0(n)]^2$ la energía de la señal anfitriona y $\sum_n [s_w(n) - s_0(n)]^2$ la energía del ruido generado por la marca de agua [1].

La robustez es más fácil de analizar. Ya que consiste en la capacidad de la marca para mantenerse igual frente a los distintos ataques, es fácil de analizar cuantitativamente usando el Bit Error Rate o BER, que consiste en el ratio entre los bits erróneos obtenidos al extraer la marca y el número de bits codificados.

$$BER (\%) = \frac{\text{bits erróneos}}{\text{bits totales}} * 100$$

Otro parámetro a tener en cuenta para decidir qué técnica utilizar en función de la aplicación es el bit rate, ya que dependiendo del tamaño del archivo de audio podremos introducir un numero limitado de bits. Esto supone para aplicaciones con archivos de audio cortos, por ejemplo, frases en una conversación, un problema, ya que limita mucho el tamaño de la marca que se pueda introducir, o, por el contrario, limita mucho la robustez de esta.

Teniendo en cuenta estos parámetros de análisis, el objetivo es evaluar los distintos códigos generados en Matlab y, en base a los resultados, evaluar las aplicaciones posibles para estas técnicas y/o proponer cambios para mejorarlos.

Las figuras representadas están tomadas con los parámetros en negrita de la tabla, los cuales representan los mejores resultados obtenidos para las ejecuciones realizadas. Todas las ejecuciones han sido tomadas con una marca de agua generada con el mismo texto para su posterior comparación.

8.1 Echo Hiding

N	511														
Weight	0.1					0.3					0.5				
rep	1			3			1			3			1		
Solapamiento	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3
SNR (dB)	20.42	21.77	22	19.7	21	21.48	11.04	12.97	13.59	11	11	12	7	9	9.418
BER(%)	41.29	39.74	41.66	45.1	40	35.26	25.16	27.24	27	20	24	22	15	20	16
Bit rate (bps)	31.31	63	93.93	10	21	31.31	31.31	62.62	93.93	10.44	20.87	31.31	31.31	62.62	93.93

N	2047														
Weight	0.1					0.3					0.5				
rep	1			3			1			3			1		
Solapamiento	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3
SNR (dB)	18.93	21.26	22.57	18.9	20.47	21	11	11.76	13.08	10	11	12	6	7	8.723
BER(%)	42	40	45	33	44	50	18	16	21	0	8	16	8	4	9
Bit rate (bps)	8	15.63	23.45	3	5	8	8	16	23	3	5	8	8	16	23

Tabla 3: Resultados algoritmo Echo Hiding para voz limpia.

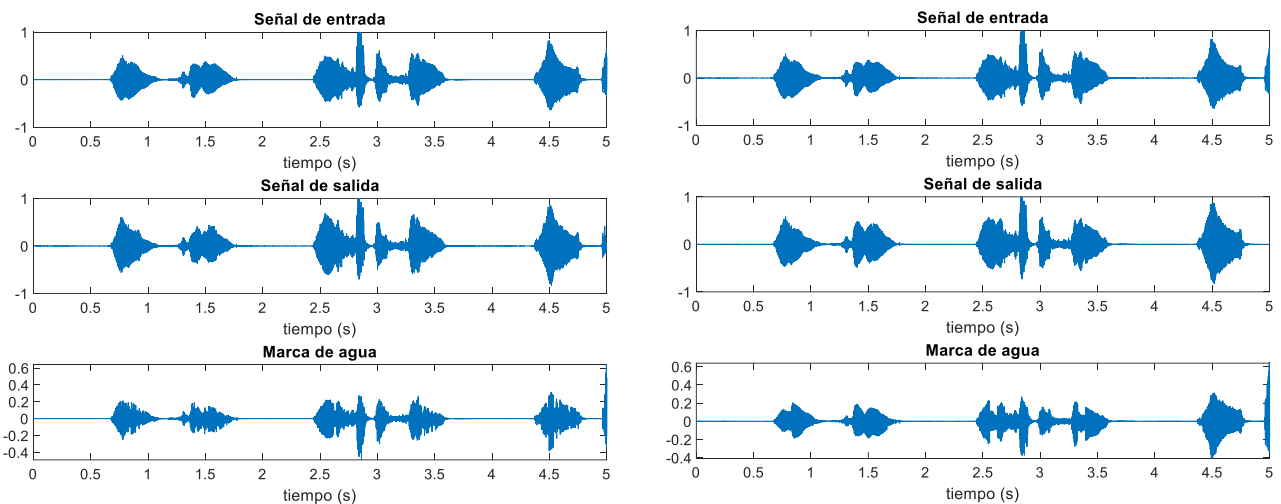


Figura 3: representación de las señales involucradas en los datos de la tabla 3. (a) $N = 511$. (b) $N = 2047$.

En general este algoritmo ha dado unos resultados muy buenos respecto al Bit error rate con pesos de la marca altos. Aunque el valor de SNR obtenido es bajo, casi todo el peso de la marca se sitúa en zonas donde la voz está presente, donde es enmascarada, por lo que la perceptibilidad de la marca es nula. Este es un ejemplo claro de la subjetividad del valor de SNR, que, aunque nos muestra la presencia de la marca en el audio, no representa fielmente si es perceptible o no.

Para otros tipos de archivo de audio, por ejemplo, archivos de música o voz con ruido ambiental, sí que resulta mas perceptible la presencia de la marca, ya que la aparición de ecos junto con los instrumentos, la propia reverberación de la canción y otros efectos de post

producción generan un audio de salida que resulta desagradable de escuchar. La propia reverberación de la canción también produce que la marca tenga una menor robustez.

8.2 Spread spectrum (dominio temporal)

N	511														
Weight	0.0005														
rep	1														
Solapamiento	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3
SNR (dB)	49.61	44.5	43	49.61	44	41.74	43.62	39.63	38.09	44	39	36	34	31	28.89
BER(%)	24.52	9.615	15.812	27.45	0	0.641	23.87	8.333	15	24	0	0	15	10	14
Bit rate (bps)	31.31	63	93.934	10	21	31.31	31.31	62.62	93.93	10.44	20.87	31.31	31.31	62.62	93.93

N	2047														
Weight	5E-04														
rep	1														
Solapamiento	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3
SNR (dB)	49.77	46.31	44.68	49.77	45.36	43	44	40.49	38.68	44	40	37	34	31	29.3
BER(%)	24	9	16	17	0	0	18	10	16	0	0	0	8	14	16
Bit rate (bps)	7.816	16	23.45	3	5	7.816	7.816	15.63	23.45	2.605	5.211	7.816	7.816	15.63	23.45

Tabla 4: Resultados algoritmo Spread spectrum en el dominio temporal para voz limpia.

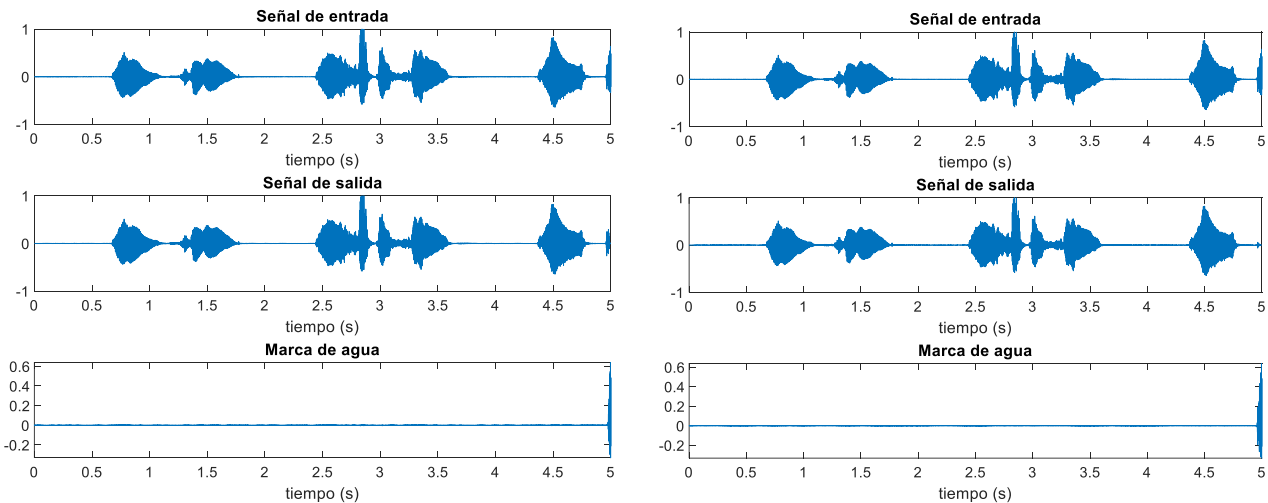


Figura 4: Representación de las señales involucradas en los datos de la tabla 4. (a) N = 511. (b) N = 2047.

De los algoritmos estudiados, este muestra los mejores resultados demostrando una SNR poco perceptible y un bit error rate aproximadamente 0. En este caso, el uso de ventanas de 511 muestras nos da unos resultados tan buenos como los de las ventanas más grandes, pero proporcionandonos un bit rate de 31.31 bps, permitiendonos la posibilidad de introducir marcas de agua muy largas en señales de audio con pocas muestras.

8.3 Spread spectrum (dominio frecuencial DFT)

N	511																	
Weight	0.05						0.1						0.3					
rep	1			3			1			3			1			3		
Solapamiento	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3
SNR (dB)	29.48	44.51	43	29.48	44	42.39	29.33	39.39	37.49	29	39	37	28	30	28.14	28	30	27.18
BER(%)	27.74	29.81	29.49	25.49	29	25.64	26.45	28.21	28	24	28	27	23	28	32	20	27	28
Bit rate (bps)	31.31	63	93.93	10	21	31.31	31.31	62.62	93.93	10.44	20.87	31.31	31.31	62.62	93.93	10.44	20.87	31.31

N	2047																	
Weight	0.05						0.1						0.3					
rep	1			3			1			3			1			3		
Solapamiento	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3
SNR (dB)	49.92	50.79	49.55	54.79	50.64	49	49	45.52	43.63	49	45	43	39	36	34.29	39	36	33
BER(%)	32	35	37	33	24	24	32	32	32	25	16	24	24	23	25	16.67	12	21.05
Bit rate (bps)	7.816	16	23.45	3	5	7.816	7.816	15.63	23.45	2.605	5.211	7.816	7.816	15.63	23.45	2.605	5.211	7.816

Tabla 5: Resultados algoritmo Spread spectrum en el dominio DFT para voz limpia.

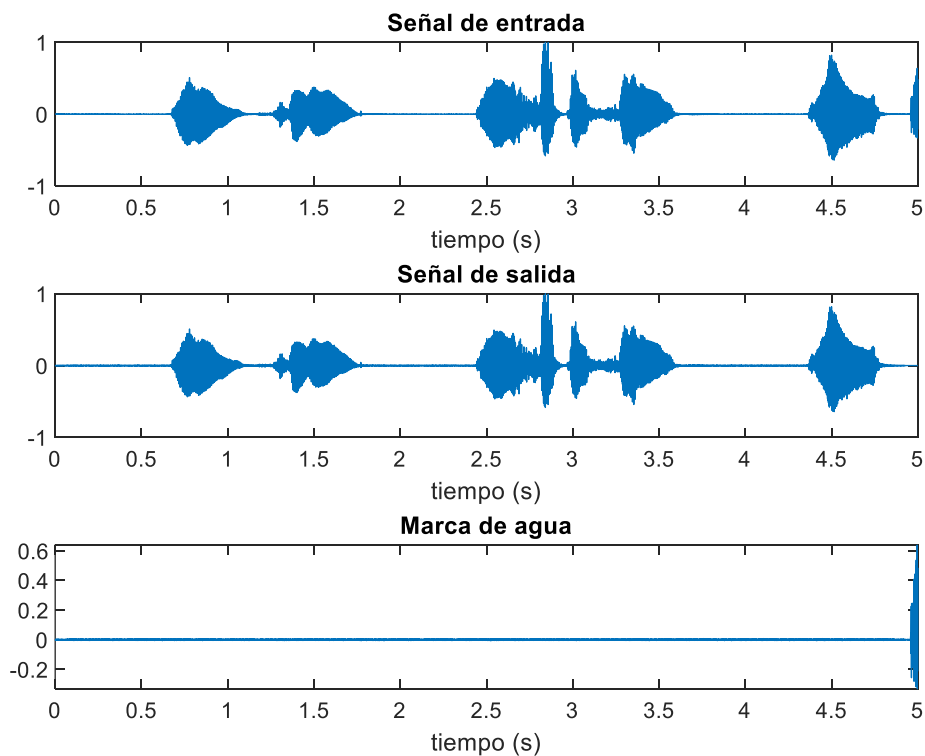


Figura 5: Representación de las señales involucradas en los datos de la tabla 5

En el caso del algoritmo spread spectrum en el dominio frecuencial, los resultados en papel sobre la perceptibilidad de la marca son bajos, ya que el efecto de la marca en la señal de la salida es prácticamente nulo (como se puede apreciar en la figura 5), sin embargo, al escuchar el audio, el ruido que genera la secuencia mls es muy perceptible al oído humano, ya que, esta vez, no está enmascarado con las zonas de más energía de la señal anfitriona. Los

resultados en cuanto a la robustez no son mejores, teniendo valores mínimos de BER iguales al 12% para pesos de la marca donde la marca es totalmente perceptible, e incluso, desagradable al oído humano.

Como uno de los problemas principales de este algoritmo resulta ser la perceptibilidad de la marca para el HAS, podríamos pensar que para otro tipo de audio con menos silencios que un archivo de voz limpia daría mejores resultados. Sin embargo, para archivos de música, el ruido que genera la marca sigue siendo muy perceptible y para voz con ruido ambiental, la extracción de la marca genera muchos bits erróneos al hacer la correlación, por lo que este algoritmo no presenta unos resultados a la altura de los otros estudiados.

8.4 Noise Shaping

N									511									
Weight			0.05						0.1						0.3			
rep		1			3			1			3			1			3	
Solapamiento	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3
SNR (dB)	25	19	21	25	19	21.72	18.83	13.45	15	18.82	13	15.44	9.294	3.865	5.499	9	4	6
BER(%)	41	39	38	31	38	35	32.26	33.01	40.6	27.45	30	36.54	25.81	25.32	32	20	24	29
Bit rate (bps)	31.31	62.62	93.93	10.44	20.87	31.31	31.31	63	93.93	10	21	31.31	31.31	62.62	93.93	10.44	20.87	31.31

N									2047									
Weight			0.05						0.1						0.3			
rep		1			3			1			3			1			3	
Solapamiento	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3	0	1/2	1/3
SNR (dB)	13.97	21.45	21.87	13.97	21.42	21	13	15.4	15.87	13	15	15	10	6	6.474	10	6	6
BER(%)	37	43	46	17	32	24	37	36	42	8.333	24	24	32	25	33	8.333	20	18.42
Bit rate (bps)	7.816	16	23.45	3	5	7.816	7.816	15.63	23.45	2.605	5.211	7.816	7.816	15.63	23.45	2.605	5.211	7.816

Tabla 6: Resultados algoritmo Spread spectrum en el dominio temporal para voz limpia incluyendo Noise Shaping.

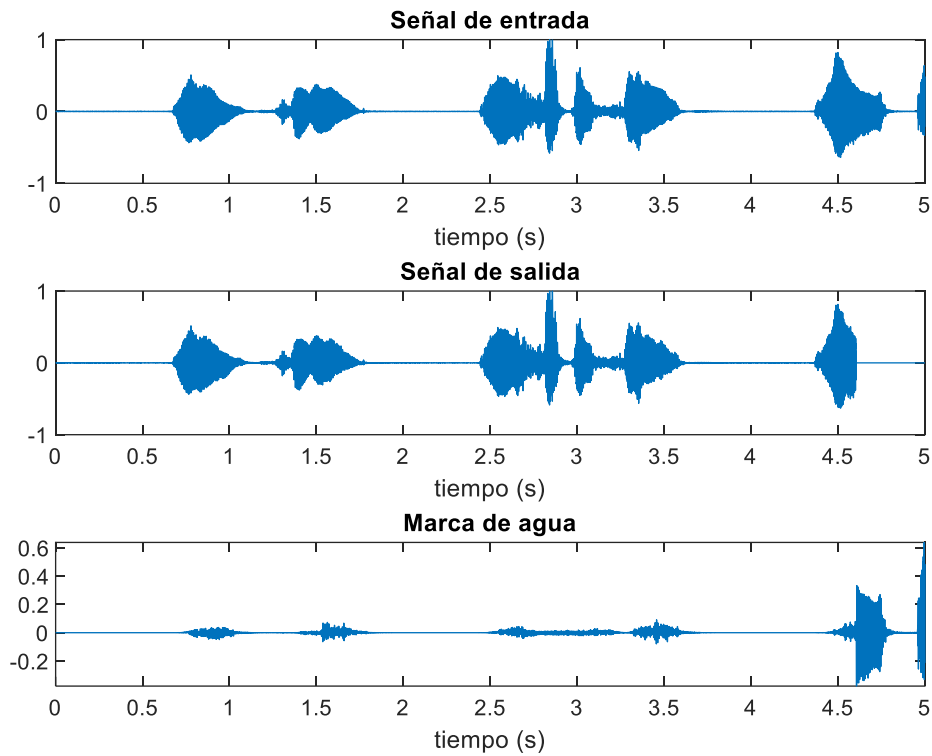


Figura 6: Representación de las señales involucradas en los datos de la tabla 6

Se puede observar como los datos obtenidos con la ampliación de Noise Shaping se obtienen unos resultados peores que los de la implementación general representados en la tabla 4, por lo general mayores tasas de Bit error rate y menores SNR. Estos errores al extraer la marca se deben principalmente a las ventanas del audio donde la energía de la señal es baja (principalmente silencios entre palabras). Aunque el SNR obtenido a través de este algoritmo sea bajo, sucede al contrario que lo ocurrido en el algoritmo anterior (o parecido al Echo Hiding), donde la marca es fuerte únicamente donde la señal anfitriona también lo es, por lo que el enmascaramiento temporal es máximo y por lo tanto la marca es prácticamente imperceptible.

9. Conclusiones

Tras el estudio de las distintas técnicas y desarrollar algoritmos en MATLAB para evaluar sus resultados, hemos podido observar a lo largo de este proyecto el funcionamiento de estas técnicas en distintos archivos de audio.

Desde el comienzo de este informe se ha hecho hincapié principalmente en dos características de las marcas de agua, siendo estas la robustez y la imperceptibilidad. La robustez consiste en la capacidad de la marca para sobrevivir a las distintas modificaciones del audio para su futura correcta extracción. La imperceptibilidad es la característica por la cual la marca es irreconocible al oído humano al escuchar un audio marcado, siendo especialmente necesaria en archivos de audio como la música.

Eco escondido o *Echo Hiding* es la primera técnica estudiada. Consiste en introducir la marca de agua mediante ecos a dos distintos retardos, dando como significado un 0 o un 1 a cada uno de ellos. Siendo la única técnica de las estudiadas dedicada únicamente al audio, los resultados obtenidos han sido muy buenos, dándonos una buena robustez con alto Bit rate y siendo poco perceptible gracias al enmascaramiento temporal. La principal propuesta de mejora que propondría para este algoritmo consiste en añadir mas ecos a los núcleos $h(n)$ con distintos pesos dándole más robustez a la marca. Esta mejora no afectaría a la perceptibilidad ya que al estar enmascarados temporalmente no deberían ser percibidos. Esta técnica sería de gran utilidad para técnicas de protección contra el copyright para archivos de audio, de voz principalmente (p.e. un podcast), ya que cuenta con una gran robustez sin afectar demasiado al audio de entrada.

Espectro ensanchado es la segunda técnica objetivo de estudio, siendo estudiada tanto en el dominio temporal como en el dominio frecuencia de la DFT. Consistiendo en añadir una secuencia pseudoaleatoria en las ventanas del dominio objetivo ponderadas y multiplicadas por 1 para el bit '1' o invertida para el bit '0' para su futura correlación con la misma secuencia en la extracción de la marca.

Para el caso de este algoritmo en el dominio temporal, este algoritmo ha dado unos resultados muy buenos tanto en robustez y en imperceptibilidad como los ha dado en tasa de Bit rate, siendo así el algoritmo con mejores resultados de los estudiados. Este algoritmo puede ser utilizado principalmente en aplicaciones de protección contra el copyright y en control de copia, ya que es robusta contra ataques tanto para voz como para música.

Noise Shaping es una mejora añadida para el algoritmo anterior. Este modifica la intensidad de la marca en función de la energía de la señal anfitriona. Este algoritmo ha presentado resultados peores, pero se debe principalmente a la gran cantidad de silencios en los audios de voz estudiados. Este añadido puede mejorar enormemente los algoritmos desarrollados si incluimos en estos un umbral de energía para marcar solo las ventanas con presencia de voz o música, dándole más robustez a la marca sin verse comprometida la perceptibilidad, gracias al enmascaramiento producido por el audio anfitrión.

Finalmente, los resultados obtenidos para el algoritmo desarrollado para espectro ensanchado en el dominio frecuencial han sido los de menor relevancia. Estos dando una perceptibilidad alta para una relación señal-marca muy baja, percibiéndose como un constante ruido blanco de fondo, y una robustez muy por debajo de las otras técnicas estudiadas. Con la implementación de los cambios en el Noise Shaping y aplicando esta técnica al algoritmo se podría encontrar alguna mejora en los resultados que permitiese a este algoritmo estar a la altura de los demás estudiados.

Otra propuesta general para todos los algoritmos desarrollados enfocada para la extracción de marcas con repetición mayor que 1 y solapamiento mayor que 0, consiste en modificar el cálculo de majority voting utilizado en la extracción de marcas con repetición y ponderar estos bits para evitar influencias de otras ventanas consecutivas marcadas.

En definitiva, el desarrollo de este proyecto ha sido satisfactorio puesto que se han podido evaluar varias técnicas de watermarking obteniendo muy buenos resultados de información útil para el desarrollo de aplicaciones que busquen la protección de los datos de autor.

Anexo 1: Sistema auditivo humano (HAS)

La imperceptibilidad de la marca es uno de los principales objetivos de las técnicas de watermarking para muchas de sus aplicaciones. En este anexo se hablará de la información necesaria que hay que conocer para entender el sistema auditivo humano y como utilizarlo para ocultar la marca en otro audio sin percibirla.

El primero de todos es el umbral absoluto de audición. El umbral absoluto de audición consiste en la mínima sonoridad a la que un tono puro puede ser percibido por el oído humano en un ambiente sin ruido. Debido a la forma de la cabeza y a la no linealidad del sistema auditivo, este umbral es dependiente de la frecuencia y de cada persona [3][4]. El umbral de audición nos proporciona el limite inferior de lo que el oído humano puede percibir, siendo el límite superior aquel que afecte permanentemente a la audición de la persona (en intensidades superiores a 100dB) por lo que se asume que cualquier sonido audible esta entre 0 y 100dB.

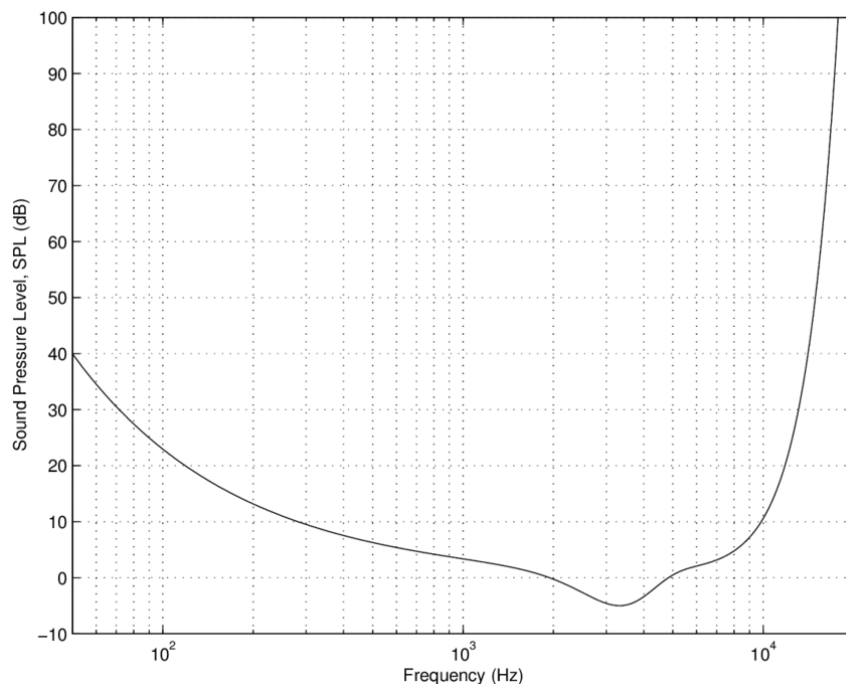


Figura 7: Umbral absoluto de audición [5]

El enmascaramiento, tanto temporal como frecuencial, es la segunda de las situaciones que nos pueden ayudar a ocultar la mascara en el audio anfitrión. El enmascaramiento ocurre cuando dos sonidos muy cercanos en frecuencia o en tiempo alcanzan nuestros oídos y el sistema auditivo humano puede percibir únicamente el tono de mayor intensidad. Cuando dos tonos son presentados al mismo tiempo y con frecuencias cercanas, el enmascaramiento es frecuencial, sin embargo, cuando los sonidos son cercanos en el dominio temporal el enmascaramiento es conocido como enmascaramiento temporal.

El enmascaramiento frecuencial se debe a que cuando nuestra membrana basilar esta excitada por el sonido más intenso, el sonido más débil no es capaz de excitar la misma banda critica de forma que podamos percibir los dos sonidos.

El enmascaramiento temporal es el que se produce un poco antes de que el sonido enmascarador comience (pre-enmascaramiento) o después de que termine (post-enmascaramiento). Cuando el HAS recibe un sonido este necesita un tiempo para preparar la percepción de otro sonido. Para el pre-enmascaramiento apenas alcanza una duración de 20ms, mientras que el post-enmascaramiento dura aproximadamente unos 150ms.

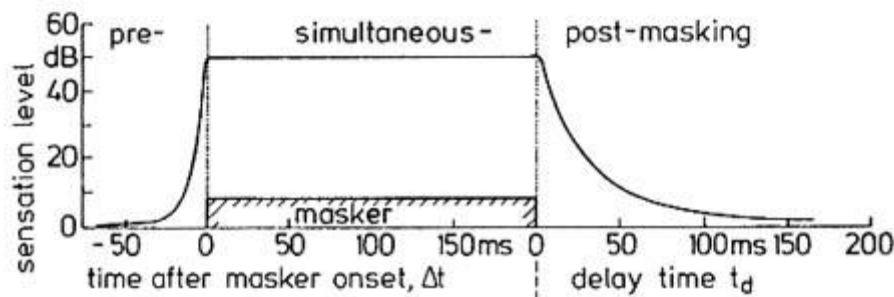


Figura 8: Esquema de las distintas regiones donde se produce enmascaramiento [6]

El último de los efectos no perceptibles son los ecos. Las ondas de sonido viajan desde la fuente al receptor a través del camino directo entre ambos, pero también se pueden producir un numero de reflexiones en los objetos y paredes de la habitación donde se esté produciendo este sonido. Estos ecos, bajo ciertas condiciones no son ni perceptibles ni molestos para el HAS. Uno de los factores que mas limitan estas condiciones es el retardo del eco. Si este fuese mayor de 50ms entonces podríamos detectar un eco limpio y claro, sin embargo, si el retardo es menor de 2ms, entonces el HAS no podría detectarlo, solo podríamos percibir una pequeña coloración del timbre.

Anexo 2: Enventanado y solapamiento.

En los algoritmos diseñados en este trabajo se cuenta con la posibilidad de enventanar el audio de entrada y aplicarle una ventana no rectangular a cada una de ellas. Esto es necesario en el código a la hora de aplicar solapamientos entre tramas diferentes, ya que permite reducir los efectos de zonas de transitorio abruptas al comienzo y al final de la señal de audio al trabajar con él junto con otros efectos causados por la variación de amplitudes para muestras cercanas entre sí.

Es por eso por lo que se diseñaron para este código distintos métodos de enventanado, estudiando el efecto del enventanado causado en el audio final. En este anexo se hablará de los resultados obtenidos en ese estudio.

Las ventanas que se pusieron a estudio fueron las más comunes en el procesamiento de audio, listadas en la siguiente tabla.

Hanning
Hamming
Blackman
Triangular
Gaussiana
Kaiser

Tabla 7: Ventanas a estudiar amplitudes solapadas

El objetivo del estudio es conocer si al solapar estas ventanas el resultado tiene un valor constante en el tiempo, de forma que, al enventanar el audio de entrada, no le de mas prioridad a unas ventanas que a otras.

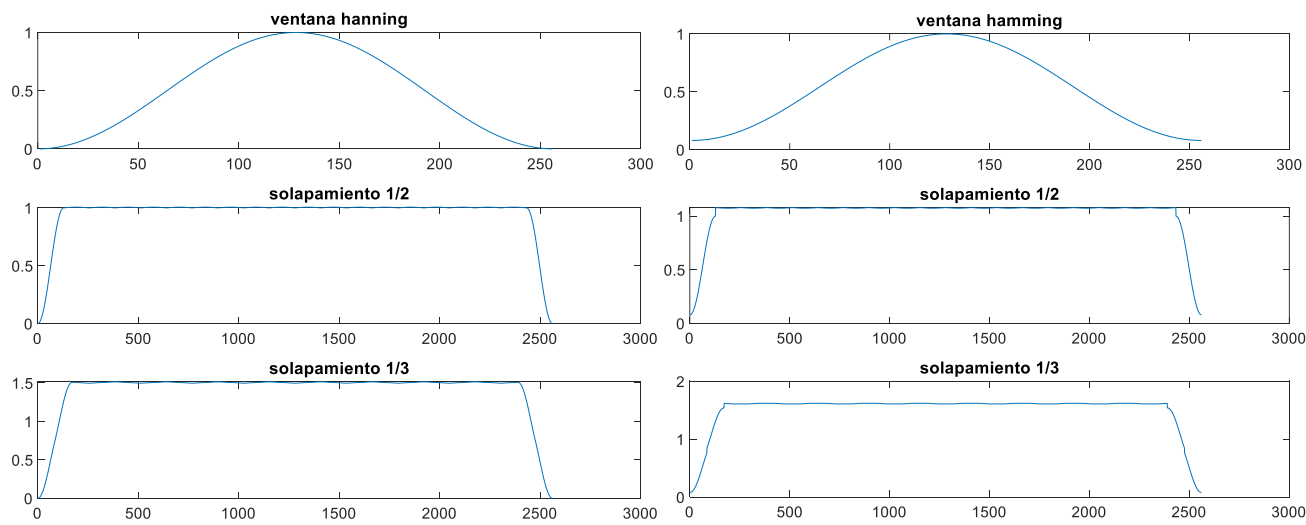


Figura 9: Ventanas Hanning y Hamming y sus correspondientes solapamientos al 50% y al 33.3%

Observando la figura 9 observamos que tanto la ventana hanning como la ventana hamming permiten un solapamiento del 50% y del 33.3% aunque se presenten unas pequeñas fluctuaciones en la zona constante, ya que tan solo modificarían el valor de esas muestras en un ± 0.0055 en el peor de los casos.

Para evitar que la señal de salida del sistema de watermarking se vea afectado por la ganancia añadida de estas ventanas, hay que normalizarlas antes de enventanar la señal de entrada.

Aquí se muestran resultados para el resto de las ventanas:

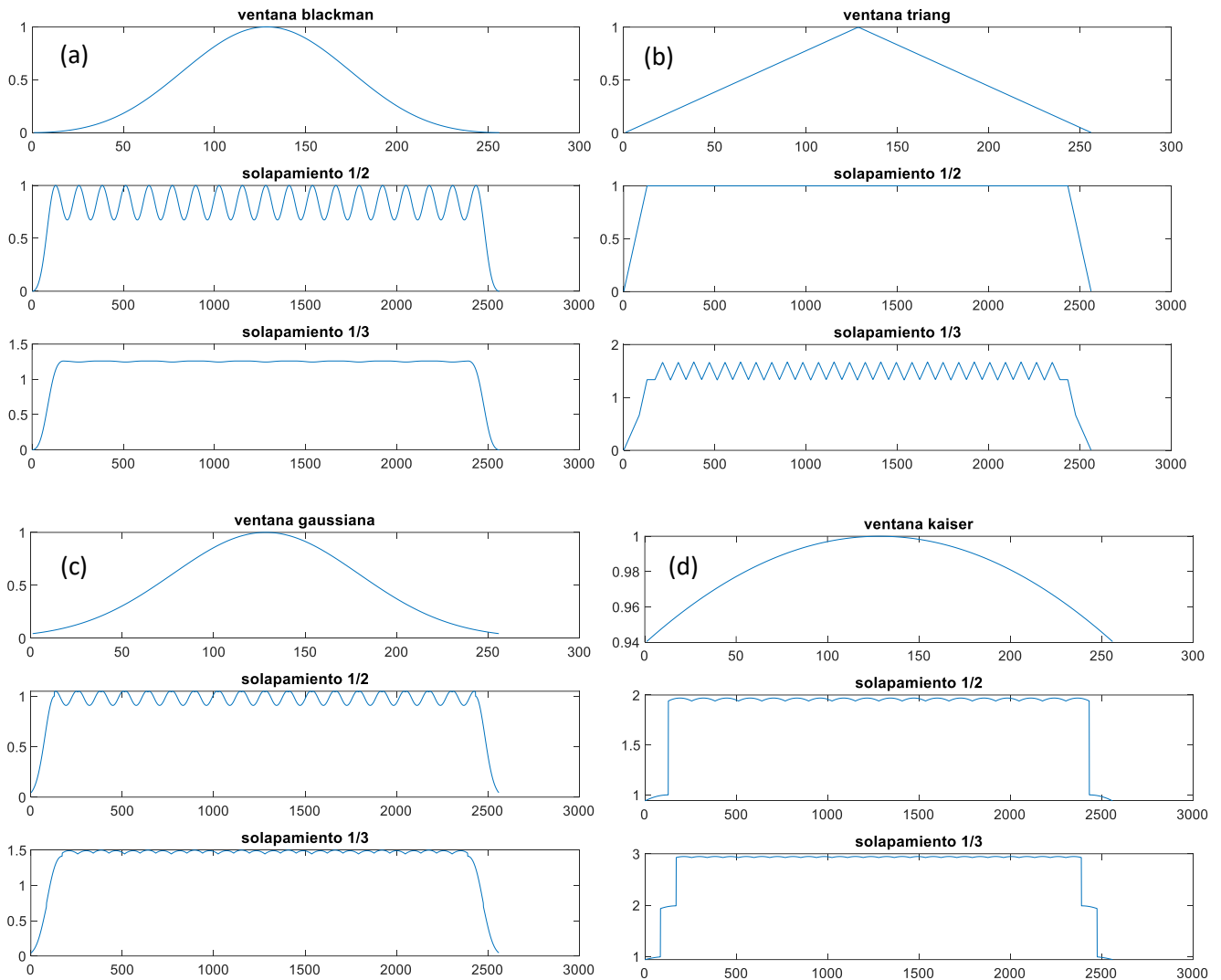


Figura 10: Ventanas y solapamientos. (a) Blackman. (b) Triangular. (c) Gaussiana. (d) Kaiser

Finalmente se han decidido implementar las siguientes ventanas junto con los siguientes solapamientos (conocidos en el código como métodos).

Número de método	Enventanado y solapamiento
Método 0	Rectangular sin solapamiento
Método 1	Hanning al 50% de solapamiento
Método 2	Hanning al 33%
Método 3	Hamming al 50%
Método 4	Hamming al 33%
Método 5	Triangular al 50%
Método 6	Rectangular al 50%
Método 7	Rectangular al 33%

Tabla 8: Métodos implementados

10. Bibliografía

- [1] Y. Lin and W.H. Abdulla, *Audio Watermark: A Comprehensive Foundation Using MATLAB*, Springer International Publishing Switzerland 2015
- [2] I.J. Cox, M.L. Miller, J.A. Bloom, J. Fridrich, T. Kalker, *Digital Watermarking and Steganography* (Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2008)
- [3] Y. Xiang, G. Hua, and B. Yan, *Digital Audio Watermarking: Fundamentals, Techniques and Challenges*. Singapore: Springer Singapore, 2017.
- [4] Joaquín González, “Acustica Fisológica 1, audición”, Material para la asignatura ingeniería acústica, UAM.
- [5] Kandadai, Srivatsan. (2020). Perceptual audio coding that scales to low bitrates.
- [6] H. Fastl and E. Zwicker, *Psychoacoustics : Facts and Models* /, 3rd ed. 2007.